

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.01.06

基于栅格节距中心峰值检测的扫描探针显微镜校准方法

石俊凯¹, 陈晓梅^{1*}, 万宇², 霍树春¹, 姜行健¹, 李冠楠¹, 周维虎¹

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了解决扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscope, SPM)现有校准方法复杂程度高且存在局限性的问题, 提出了一种基于二维标准微尺度正交栅格的SPM校准方法, 通过对扫描获取的栅格图像进行互相关/卷积(Cross-correlation/Convolution, CC)滤波, 实现对栅距中心坐标的峰值检测。校准的运动几何误差包括 x 轴和 y 轴位置偏差 Δx 和 Δy 、沿 x 轴和 y 轴扫描的直线度偏差 δy 和 δx 以及两轴之间的正交性偏差 γ_{xy} 。根据 x 轴和 y 轴扫描像素数、扫描范围、标准栅格计量检定节距平均值、栅距平均值计算出校准因子 C_x 和 C_y 。采用标称节距为 $10\ \mu\text{m}$ 的正交栅格样板对原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)进行校准实验, 结果显示 C_x 和 C_y 分别为 0.925 和 1.050 , γ_{xy} 为 0.015° , 该台AFM的校准扩展不确定度为 $0.33\ \mu\text{m}(k=2.56)$ 。研究成果对于推动SPM校准标准文件的具体实施和执行具有积极意义, 并为SPM仪器研制及性能评估提供了技术参考。

关键词: 扫描探针显微镜; 原子力显微镜; 运动几何误差; 校准和测量; 栅格节距中心

中图分类号: TB92; TH742 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 01-0073-07

SPM calibration method based on peak detection of lattice pitch centers

SHI Junkai¹, CHEN Xiaomei^{1*}, WAN Yu², HUO Shuchun¹, JIANG Xingjian¹, LI Guannan¹, ZHOU Weihu¹

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: To address the complexity and limitations of existing calibration methods for Scanning Probe Microscope (SPM), this article proposed a novel SPM calibration method by using a 2D micro-scale orthogonal lattice standard and peak detection (PD) method of the pitch center coordinates based on cross-correlation / convolution (CC) filtering of raster-scanned images. The geometric errors of motion include positional deviations Δx and Δy , straightness deviations δy and δx along x -axis and y -axis respectively, and the orthogonality deviation γ_{xy} between the two axes. The calibration factors C_x and C_y were calculated based on the number of pixels scanned on the x -axis and y -axis, scanning range, average pitch of standard grid metrology verification, and average grid spacing. Through case study, an AFM was calibrated using an orthogonal lattice standard with a nominal pitch of $10\ \mu\text{m}$, resulting in C_x and C_y values of 0.925 and 1.050 , respectively, and an orthogonal deviation γ_{xy} of 0.015° . The expanded uncertainty of calibration for this AFM was $0.33\ \mu\text{m}(k=2.56)$. This SPM calibration method will promote the implementation and execution of SPM calibration standard documents, and has technical reference value for the development and performance evaluation of SPM instruments.

Key words: SPM; AFM; motion geometric error; calibration and measurement; lattice pitch center

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-01-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3207104)

引用格式: 石俊凯, 陈晓梅, 万宇, 等. 基于栅格节距中心峰值检测的扫描探针显微镜校准方法[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 73-79.

Citation: SHI J K, CHEN X M, WAN Y, et al. SPM calibration method based on peak detection of lattice pitch centers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 73-79.



0 引言

SPM是一族微纳科学技术领域不可或缺的分析仪器的统称^[1]。AFM是一种较为典型的SPM,它能够以纳米级分辨力表征导体、半导体和非导电样品表面的几何尺寸和形态,还可以表征样品材料的其他性质,如电学、化学和机械性质^[2-3]。近年来,AFM被广泛应用于对移动和定位精度要求较高的微操控和微制造中^[4]。

SPM系统的关键部件是 x - y - z 压电扫描微位移台(简称扫描器),它具有亚埃分辨力、结构紧凑和高速电响应等优点,但也存在非线性、滞后、蠕变、老化以及 x 、 y 、 z 扫描位移相互干扰等问题^[5]。当 x - y 扫描器做栅状扫描(raster-scan)运动以及 z 扫描器做垂直收缩和伸长运动时,上述问题会导致扫描器产生运动几何误差,需要通过一维和二维微纳米级标准光栅和栅格定期校准扫描器,并通过软件校正和补偿技术将其误差降至最低。

ISO / DIS 11952标准^[6]概述了SPM的 x - y 扫描器中运动几何误差校准测量片应用标准要求(术语含义如表1所示),包括二维微纳正交栅格结构可用于校准正交性偏差 γ_{xy} ^[7],一维和二维栅格标准可用于测量并计算出校准因子 C_x 和 C_y 、 x 轴和 y 轴上的位置偏差(即非线性) Δx 和 Δy ^[8]以及 x - y 平面直线度(即串扰) δy 和 δx ^[9]。

表1 术语含义
Tab.1 Meaning of terms

术语符号	含义
XOY	二维栅格标准的二维坐标系
xoy	SPM的二维坐标系
C_x 、 C_y	x 轴、 y 轴校准因子
Δx	沿 x 坐标扫描的位置偏差
Δy	沿 y 坐标扫描的位置偏差
δy	沿 x 坐标扫描的直线度偏差
δx	沿 y 坐标扫描的直线度偏差
γ_{xy}	沿 x 轴扫描和 y 轴扫描的正交性偏差

使用SPM对片上标准栅格进行栅状扫描获得其三维形貌数据,提取栅格节点中心坐标 (x, y) 用于计算节点间距、非线性和失真。ISO / DIS 11952

标准^[6]中给出了基于重心(Center of Gravity, CG)^[10-11]和傅立叶变换(Fourier Transformation, FT)^[12]的评价方法。然而,由于表面形貌信息包含不同程度的噪声,且二维标准栅格坐标系 XOY 与SPM扫描坐标平面 xoy 之间会形成未知的 θ 角,在实际应用中难以使用CG方法准确定位二维栅格标准中每个结构的重心。FT方法通过傅立叶分析获取表面形貌信息的基频,基频的倒数即为线节距平均值,但是FT方法无法获取栅格节距均匀性、偏差等参数。

针对SPM现有校准方法复杂程度高且存在局限性的问题,本文提出基于栅格节距中心峰值检测的SPM校准方法,利用互相关/卷积滤波峰值检测(Peak-detection, PD)方法^[13-14],从SPM扫描的二维正交晶格标准图像中快速提取每个栅格中心的 x 、 y 坐标,从而实现SPM的校准。

1 PD方法

基于互相关/卷积滤波的峰值检测方法示意图如图1所示。栅格节距分别为 P_x 和 P_y 的二维标准微尺度栅格安装在SPM的样品台上,二维标准微尺度栅格的坐标系 XOY 相对于SPM的 x - y 扫描器的扫描坐标系 xoy 具有方位角 θ ,则具有 P_x 和 P_y 周期的扫描表面形态信号 $f(x, y)$ 中存在噪声 $W(x, y)$ 和非线性变化成分 $U(x, y)$,合成信号 $F(x, y)$ 为

$$F(x, y) = f(x, y) + U(x, y) + W(x, y) \quad (1)$$

式中: $F(x, y)$ 、 $f(x, y)$ 、 $U(x, y)$ 、 $W(x, y)$ 均为 $M \times N$ 矩阵数据。

如果CC滤波函数是一个二维正弦函数,周期值为 P_{Tx} 和 P_{Ty} ,在半个周期内具有 $M_T \times N_T$ 像素的矩阵。当它与合成信号 $F(x, y)$ 互相关/卷积时,式(1)可转换为互相关/卷积函数,即

$$R_{TF}(x, y) = R_{Tf}(x, y) + R_{TU}(x, y) + R_{TW}(x, y) \quad (2)$$

式中: $R_{TF}(x, y)$ 为经滤波的全信号, $R_{Tf}(x, y)$ 为表面形态信号, $R_{TU}(x, y)$ 为漂移信号, $R_{TW}(x, y)$ 为残余噪声信号。 $R_{TF}(x, y)$ 、 $R_{Tf}(x, y)$ 、 $R_{TU}(x, y)$ 、 $R_{TW}(x, y)$ 均为 $M \times N$ 矩阵数据。

若 P_{Tx} 近似等于 P_x 且 P_{Ty} 近似等于 P_y ,则由式(2)可得到以下解释和结论:① $R_{Tf}(x, y)$ 是与 $f(x, y)$ 具有相同周期的周期函数;②如果非线性

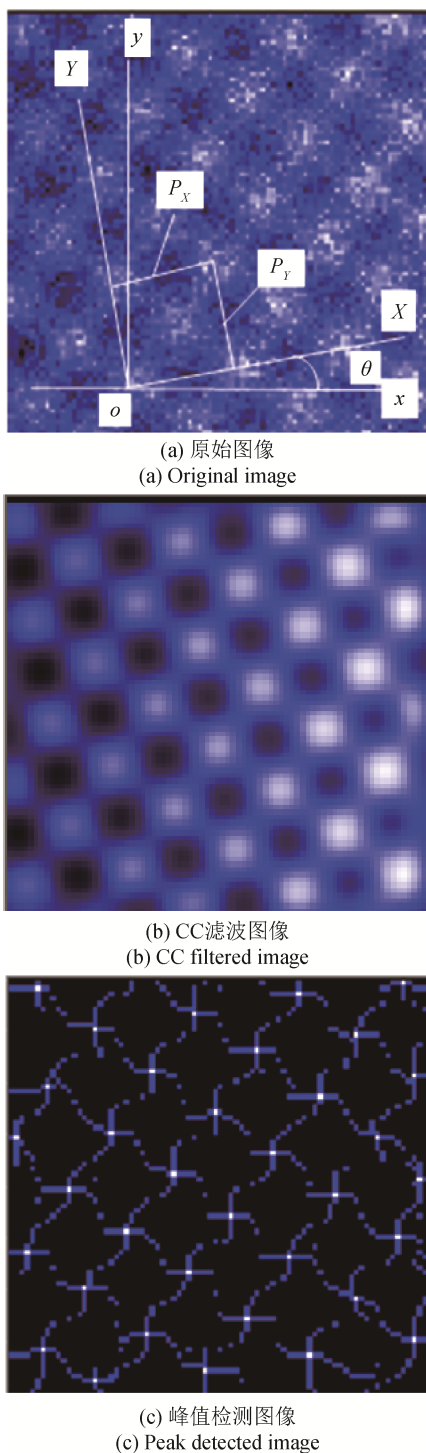


图1 基于互相关 / 卷积滤波的峰值检测方法示意图
Fig.1 Schematic diagram of peak detection (PD) method based on cross correlation / convolution (CC) filtering

漂移分量 $U(x, y)$ 是用 n 阶多项式表示的非线性漂移分量, 则 $R_{TW}(x, y)$ 仍然是 n 阶多项式的非线性分量; ③具有高密度微观不均匀性的噪声信号 $W(x, y)$ 被减小为平滑变化的分量 $R_{TW}(x, y)$ 。

经过二维 CC 滤波后的全信号如图 1(b) 所示。

不必处理包含与二维微尺度栅格的位置相关并含有噪声的合成图像 $F(x, y)$, 直接处理互相关合成信号 $R_{TF}(x, y)$ 。

在检测到滤波后的全信号 $R_{TF}(x, y)$ 的局部最大值后, 进行图像重建和配准处理, 从式(2)中去除非线性漂移分量, 得到如图 1(c) 所示的三值图像。在图 1(c) 中, 栅格结构的中心点(亮像素: 像素值 2)为真正的局部最大值点, 网络结构上的其他点(彩色像素: 像素值 1)均为伪局部最大值, 其余的暗像素(像素值 0)为非最大值点。根据图 1(c) 可提取二维栅格的中心点坐标。

PD 方法是利用二维 CC 滤波结合局部最大值检测和图像处理技术, 检测与二维微尺度栅格位置相关的形态信号中的各个峰值位置或谷值位置的方法。使用 PD 方法检测波峰还是波谷取决于二维标准栅格的结构, 山丘和圆柱阵列结构采用峰值检测, 孔和坑的阵列结构采用谷值检测。

2 运动几何误差算法

参考 ISO230-1 标准^[15]中几何精度的解释, 对本文所要校准的几何运动误差进行推导。栅格节点中心峰值位置和坐标示意图如图 2 所示, 其中, 实心圆和十字分别为 SPM 扫描图像的理想正交栅格节点峰值位置和实际栅格节点峰值位置, 细实线为按行和按列拟合的直线。 x_{ij} 和 y_{ij} 分别为第 i 行与第 j 列交叉栅格节点峰值的 x 和 y 坐标 ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$), 则第 i 行与第 $j+1$ 列交

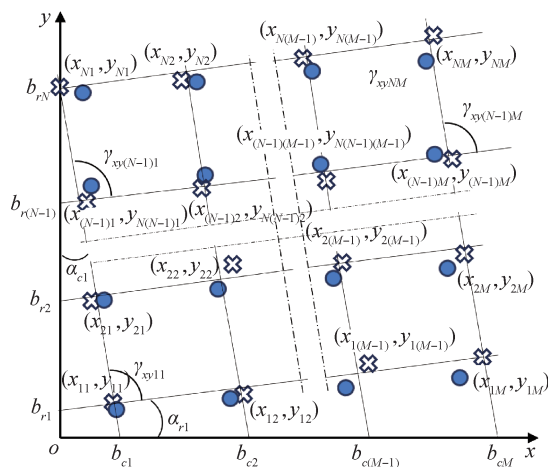


图2 栅格节点中心峰值位置和坐标示意图
Fig.2 Diagram of peak position and coordinates of lattice node center

叉的栅格节点到第*i*行与第*j*列交叉的栅格节点之间的栅距为

$$P_{xij} = [(x_{i(j+1)} - x_{ij})^2 + (y_{i(j+1)} - y_{ij})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

第*j*列与第*i*+1行交叉的栅格节点至第*j*列与第*i*行交叉的栅格节点之间的栅距为

$$P_{yij} = [(x_{(i+1)j} - x_{ij})^2 + (y_{(i+1)j} - y_{ij})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, N-1, j = 1, 2, \dots, M-1$ 。

栅距平均值 \overline{P}_x 和 \overline{P}_y 计算公式为

$$\overline{P}_x = \frac{1}{M-1} \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N-1} P_{xij} \quad (5)$$

$$\overline{P}_y = \frac{1}{M-1} \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} \sum_{i=1}^{N-1} P_{yij} \quad (6)$$

N_x 和 N_y 分别为*x*轴方向和*y*轴方向扫描像素数， S_x 和 S_y 分别为*x*轴方向和*y*轴方向扫描范围，标准栅格的计量检定节距平均值为 P_C ，则SPM的*x*轴和*y*轴的校准因子 C_x 和 C_y 计算公式为

$$C_x = (P_C \cdot N_x / S_x) / \overline{P}_x \quad (7)$$

$$C_y = (P_C \cdot N_y / S_y) / \overline{P}_y \quad (8)$$

基于*x*和*y*方向上的每个节距 P_{xij} 和 P_{yij} ($i = 1, 2, \dots, M-1, j = 1, 2, \dots, N-1$)，计算每个沿*x*轴扫描的栅格节点位置偏差 Δx_{ij} 和沿*y*轴扫描的栅格节点位置偏差 Δy_{ij} ，公式为

$$\Delta x_{ij} = P_{xij} - P_C \cdot N_x / S_x \quad (9)$$

$$\Delta y_{ij} = P_{yij} - P_C \cdot N_y / S_y \quad (10)$$

根据每行和每列栅格节点中心坐标，可以拟合每行直线 $y_i = (\tan \alpha_{ri}) \cdot x_i + b_{ri}$ 和每列直线 $x_j = (\tan \alpha_{cj}) \cdot y_j + b_{cj}$ ，斜度角 α_{ri} 和 α_{cj} 以及每行直线在*x*轴和每列直线在*y*轴上的初始值 b_{ri} 和 b_{cj} ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$)如图2所示。根据点到直线的距离公式，沿*x*轴扫描各节点的直线度偏差 δy_{ij} 和沿*y*轴扫描各节点的直线度偏差 δx_{ij} ($i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$)分别为

$$\delta y_{ij} = \frac{y_{ij} - (\tan \alpha_{ri}) \cdot x_{ij} - b_{ri}}{[(\tan \alpha_{ri})^2 + 1]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$$\delta x_{ij} = \frac{x_{ij} - (\tan \alpha_{cj}) \cdot y_{ij} - b_{cj}}{[(\tan \alpha_{cj})^2 + 1]^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

根据拟合直线斜率的正切角 α_{ri} 和 α_{cj} ，计算*x-y*扫描器的正交性偏差 γ_{xy} ，即

$$\gamma_{xy} = \tan^{-1} \left[\tan \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{ri} \right) - \tan \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \alpha_{cj} \right) \right] \quad (13)$$

3 实验研究

3.1 校准设置

采用二维正交栅格(VLSI Standards Incorporated的表面形貌标准)进行实验。在硅芯片上蚀刻二维阵列方形孔，这些孔形成的行和列呈正交分布，标称节距为10 μm。根据VLSI提供的量值可溯源到美国NIST的计量检定证书，该样板的平均节距为10.03 μm，检定扩展不确定度为0.03 μm ($k = 2.56$)。待校准AFM的压电扫描器最大*x-y*扫描范围为100 μm × 100 μm，没有闭环反馈的主动位置控制。测量前设置AFM扫描参数：①*x*轴和*y*轴扫描范围 $S_x \times S_y = 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ；②*x*轴和*y*轴扫描像素数 $N_x \times N_y = 256 \times 256$ ；③扫描频率为0.5 Hz。

3.2 图像采集和偏差计算

用AFM扫描标称节距10 μm的二维正交栅格，得到含有噪声的原始图像如图3(a)所示。由于原始扫描图像中存在多项式表面漂移误差，同时考虑到需要谷检测的限制，首先，使用SPIP®软件对图像进行调平，调平后的图像如图3(b)所示；然

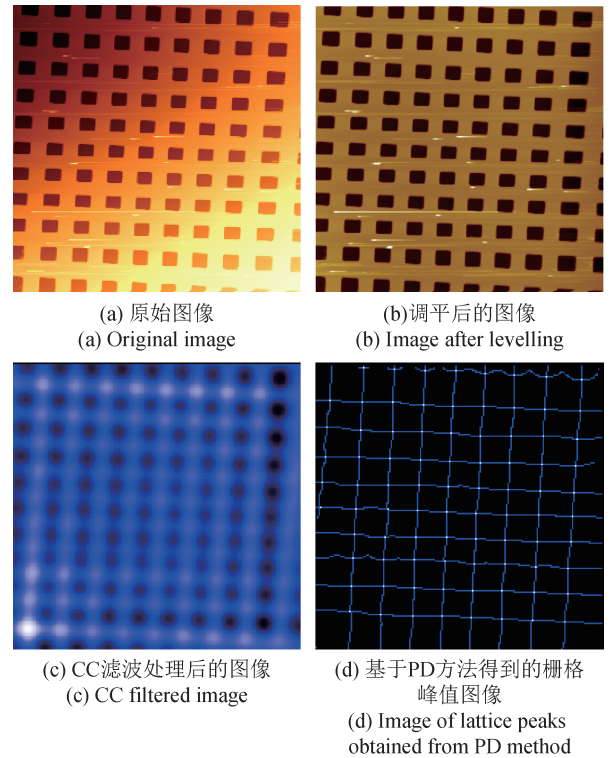


图3 用AFM在100 μm × 100 μm范围扫描10 μm栅格节距的二维栅格图像

Fig.3 Image of 10 μm pitch 2D lattice scanned by AFM in a range of 100 μm × 100 μm

后，在LabVIEW中使用自主开发的程序对调平后的图像进行CC滤波处理，CC滤波处理后的图像如图3(c)所示；最后，利用PD方法检测图3(c)得到节距中心，结果如图3(d)所示，共检测到10行9列栅格节点峰值坐标。

可以从图3(d)中快速提取按行(或 x 方向)和列(或 y 方向)排列的节点中心坐标，节距中心坐标和回归直线如图4所示。利用Excel分别绘制了按行和列计算的实际节距值，如图5和图6所示。10.03 μm 的标准栅格节距值等于25.677 pixel。

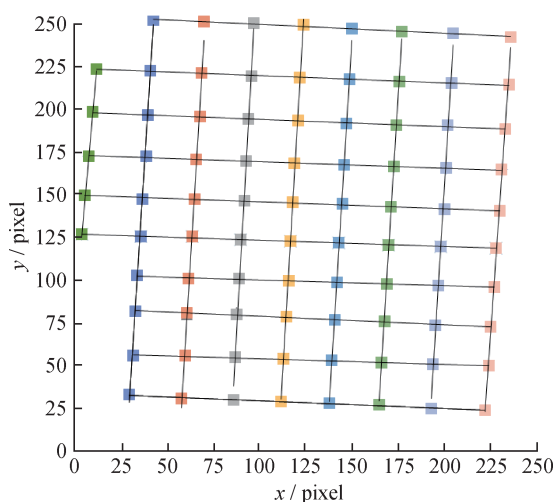


图4 节距中心坐标和回归直线

Fig.4 Pitch center coordinates and regression straight lines

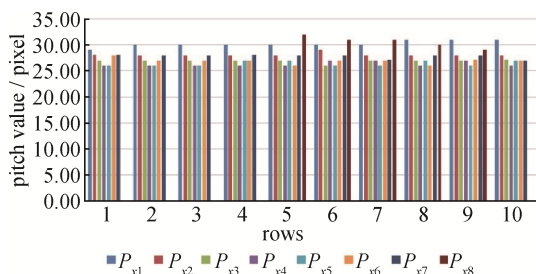


图5 1至10行中相邻节点的节距值 P_{x1} 至 P_{x8}

Fig.5 Pitch values P_{x1} to P_{x8} in rows 1 to 10

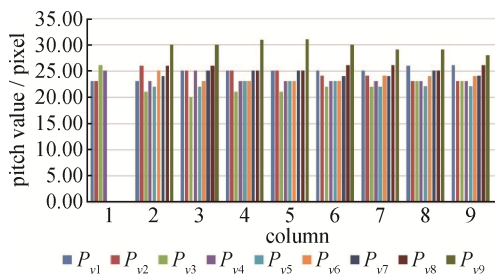


图6 1至9列中相邻节点的节距值 P_{y1} 至 P_{y9}

Fig.6 Pitch values P_{y1} to P_{y9} in columns 1 to 9

3.3 校准结果分析

计算得到行和列的节距平均值分别为27.750 pixel和24.447 pixel，标准偏差分别为1.528 pixel和2.437 pixel。换算为长度量，行和列的节距平均值分别为10.840 μm 和9.550 μm ，标准偏差分别为0.597 μm 和0.952 μm 。二维标准栅格的检定平均节距为10.03 μm ，因此计算得到AFM的校准因子 C_x 和 C_y 分别为0.925和1.050。

沿 x 轴扫描的位置偏差 Δx 和沿 y 轴扫描的位置偏差 Δy 分别如图7和图8所示。沿 x 轴扫描的最小和最大位置偏差分别为0 μm 和2.476 μm ；沿 y 轴扫描的最小和最大位置偏差分别为-2.208 μm 和2.104 μm 。由图7和图8可知，每行的位置偏差 Δx 均为正值，每列的位置偏差 Δy 在 y 轴扫描范围的两侧为正值，在中间为负值，且两侧的偏差均比中间大。由图3亦可知节距在扫描范围的两侧较大，中间较小，且整体来看行节距大于列节距。

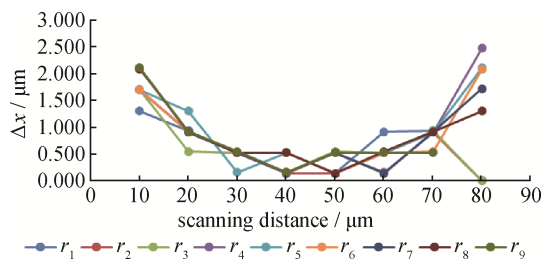


图7 x 轴方向的位置偏差 Δx

Fig.7 Positional deviation Δx along x -axis

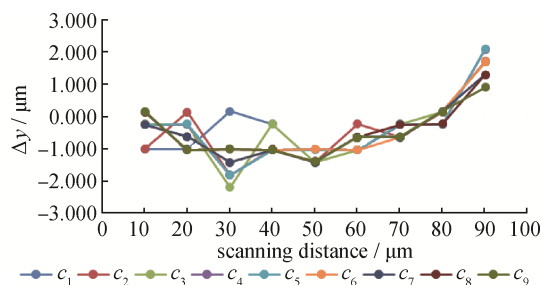


图8 y 轴方向的位置偏差 Δy

Fig.8 Positional deviation Δy along y -axis

用Excel将每行每列中的节距中心坐标拟合为直线，分别得到每行和每列直线的斜率 α_r 和 α_c ，以及 x 轴和 y 轴上的初始值 b_r 和 b_c 。随后计算沿 x 轴扫描的直线度偏差 δy 和沿 y 轴扫描的平直度偏差 δx ，分别如表2和表3所示， $r_1 \sim r_{10}$ 为行， $c_1 \sim c_9$ 为列。 δy 最大正值和负值偏差分别为1.01 pixel和-1.3 pixel，

表2 直线的斜率 $\tan\alpha_r$ 、 y 轴的起点坐标 b_r 以及每行线性回归后计算的各个节点位置偏差 δy

Tab.2 Slope of straight-line $\tan\alpha_r$, starting point coordinate of y -axis b_r , and positional deviation δy calculated after linear regression in each row

行	$\tan\alpha_r$	$b_r /$ pixel	$\delta y_1 /$ pixel	$\delta y_2 /$ pixel	$\delta y_3 /$ pixel	$\delta y_4 /$ pixel	$\delta y_5 /$ pixel	$\delta y_6 /$ pixel	$\delta y_7 /$ pixel	$\delta y_8 /$ pixel	$\delta y_9 /$ pixel
r_1	-0.04	34.04	0.02	0.33	-0.41	-0.19	-0.01	0.16	0.43	-0.31	
r_2	-0.03	57.66	0.10	0.12	0.07	-0.02	-0.14	-0.26	-0.35	0.59	
r_3	-0.05	83.93	0.10	0.54	-0.15	0.15	-0.60	-1.30	1.00	0.35	
r_4	-0.03	103.84	0.01	0.05	0.01	-0.05	-0.16	-0.23	0.70	-0.33	
r_5	-0.04	127.49	-0.08	0.05	0.10	0.11	0.09	0.10	-0.92	0.13	0.34
r_6	-0.04	150.28	0.10	0.30	0.46	-0.50	-0.42	-0.38	-0.31	0.81	0.05
r_7	-0.04	173.68	-0.17	-0.02	0.05	0.08	0.11	0.11	0.14	-0.83	0.36
r_8	-0.04	199.01	-0.07	-0.73	0.48	0.65	-0.23	-0.06	0.06	0.27	-0.42
r_9	-0.04	224.46	-0.41	-0.11	0.06	0.19	0.32	0.40	-0.47	-0.30	-0.08
r_{10}	-0.05	255.84	0.31	-0.04	0.45	-0.11	-0.73	-0.29	0.15	0.58	

表3 直线的斜率 $\tan\alpha_c$ 、 x 轴的起点坐标 b_c 以及每列线性回归后计算的各个节点位置偏差 δx

Tab.3 Slope of straight-line $\tan\alpha_c$, starting point coordinate of x -axis b_c , and positional deviation δx calculated after linear regression in each column

列	$\tan\alpha_c$	$b_c /$ pixel	$\delta x_1 /$ pixel	$\delta x_2 /$ pixel	$\delta x_3 /$ pixel	$\delta x_4 /$ pixel	$\delta x_5 /$ pixel	$\delta x_6 /$ pixel	$\delta x_7 /$ pixel	$\delta x_8 /$ pixel	$\delta x_9 /$ pixel	$\delta x_{10} /$ pixel
c_1	0.082	-6.36	0.08	-0.02	-0.13	0.01	0.06					
c_2	0.059	28.37	0.29	-0.36	0.15	0.38	-0.28	0.00	-0.54	-0.14	0.38	0.13
c_3	0.055	56.66	0.37	-0.25	0.13	0.23	-0.38	-0.17	0.10	-0.52	-0.08	0.57
c_4	0.052	84.04	-0.39	-0.09	0.21	0.31	0.51	-0.29	-0.09	0.21	-0.49	0.13
c_5	0.054	110.41	-0.04	0.30	-0.37	-0.24	-0.01	0.22	0.45	-0.21	0.12	-0.22
c_6	0.056	136.40	-0.02	0.38	-0.26	-0.03	0.27	-0.44	-0.14	0.21	-0.33	-0.36
c_7	0.056	163.38	-0.11	0.30	-0.35	-0.11	0.18	0.42	-0.23	0.12	-0.42	0.21
c_8	0.057	191.28	-0.28	0.21	0.53	-0.15	0.17	-0.57	-0.19	0.25	-0.32	0.34
c_9	0.065	220.52	0.08	-0.22	0.28	-0.22	0.28	-0.28	0.29	-0.15	-0.45	0.38

δx 最大正值和负值偏差分别为0.53 pixel和-0.57 pixel。

行和列拟合直线的平均斜率值分别为 $\tan\alpha_r = 0.042$ 和 $\tan\alpha_c = 0.057$ ，计算得到AFM沿 x 轴扫描和沿 y 轴扫描的正交偏差 γ_{xy} 为 0.015° 。

校准不确定度主要包括：①二维正交栅格样板检定的标准不确定度 u_1 ；②使用CC方法对 S_x 扫描范围、 N_x 采样点数的AFM图像处理时，1个像素分辨力产生的标准不确定度 u_2 ， $u_2 = S_x / (3 \cdot N_x)$ 。

本实验中， $u_1 = 0.01 \mu\text{m}$ ， $u_2 = 0.13 \mu\text{m}$ 。计算得出标准不确定度 u 为

$$u = (u_1^2 + u_2^2)^{\frac{1}{2}} = 0.13 \mu\text{m} \quad (14)$$

最终，计算得出其扩展不确定度 $U = 0.33 \mu\text{m}$ ($k = 2.56$)。

4 结论

开展了基于二维微尺度正交栅格标准样板的SPM校准方法研究，采用SPM扫描正交栅格获取

图像并进行CC滤波,之后对栅距中心坐标进行峰值检测,实现SPM几何误差校准。采用标称节距为 $10\ \mu\text{m}$ 的正交栅格样板对AFM进行校准,结果表明 C_x 和 C_y 分别为0.925和1.050,沿 x 轴扫描和沿 y 轴扫描的正交偏差 γ_{xy} 为 0.015° ,AFM的校准扩展不确定度为 $0.33\ \mu\text{m}(k=2.56)$ 。本研究将国内和国际标准中尚未具体实施的方法落实到实际应用中,为SPM仪器研制过程中的标定和校准提供了重要参考。

参考文献

- [1] International Organization for Standardization. Surface chemical analysis-scanning probe microscopy-terms used in scanning-probe microscopy: ISO / DIS 18115-2 [S]. 2010.
- [2] GANSER C, UCHIHASHI T. Measuring mechanical properties with high-speed atomic force microscopy [J]. *Microscopy*, 2023.
- [3] ROSARIO R, OHURA S, MIYASHIRO D, et al. Atomic force microscopy characterization of polyacrylamide substrate for traction force application [J]. *Solid State Phenomena*, 2023, 352:15-23.
- [4] YANG C, DANG C, ZHU W, et al. High-speed atomic force microscopy in ultra-precision surface machining and measurement: challenges, solution and opportunities [J]. *Surface Science and Technology*, 2023, 1: 2-22.
- [5] RAINA G. Atomic force microscopy as a nanometrology tool: some issues and future targets [J]. *Mapan*, 2013, 28: 311-319.
- [6] Surface chemical analysis-scanning probe microscopy-determination of geometric quantities using SPM: calibration of measuring systems: ISO/DIS 11952 [S]. 2014.
- [7] TAN W, TANG Z, XIAO G, et al. Calibrate the non-orthogonal error of AFM with two-dimensional self-traceable grating [J]. *Ultramicroscopy*, 2023, 249.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. 扫描探针显微镜校准规范: JJF 1351-2012 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2012. State Administration for Market Regulation. Calibration specification for scanning probe microscopy: JJF 1351-2012 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012. (in Chinese)
- [9] K LAPETEK P, PICCO L, PAYTON O, et al. Error mapping of high-speed AFM systems [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24.
- [10] MELI F, THALMANN R. Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9: 1087-1092.
- [11] MISUMI I, GONDA S, KUROSAWA T, et al. Uncertainty in pitch measurements of one-dimensional grating standards using a nanometrological atomic force microscope [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14: 463-471.
- [12] DAI G, KOENDERS L, POHLENZ F, et al. Accurate and traceable calibration of one-dimensional grating [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16: 1241-1249.
- [13] CHEN X, KOENDERS L. A novel pitch evaluation of one-dimensional gratings based on a cross-correlation filter [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25.
- [14] CHEN X, KOENDERS L, PARKINSON S. Correlation and convolution filtering and image processing for pitch evaluation of 2D micro- and nano-scale gratings and lattices [J]. *Applied Optics*, 2017, 56: 2434-2443.
- [15] International Organization for Standardization. Test code for machine tools part 1: geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions: BS ISO 230-1 [S]. 2012.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 石俊凯(1986—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学精密测量、微纳检测、飞秒激光技术。



通讯作者: 陈晓梅(1961—), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学微纳计量与测试。